



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**PROBLEMATIKA VYUŽITÍ KAPALINY VE TVÁŘECÍCH  
PROCESECH**

UTILIZATION OF LIQUID IN FORMING PROCESSES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Matúš Horňák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Matúš Horňák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Problematika využití kapaliny ve tvářecích procesech

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vypracování literární rešerše možného využití kapaliny především jako nepevného tvářecího média v oblasti moderních či speciálních tvářecích technologií. Zpracování bude obsahovat přehled v současné době využívaných metod, jejich principy, příklady vyráběných dílů, výhody a nevýhody.

### Cíle bakalářské práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na užití kapaliny pro tváření,
- popis jednotlivých metod včetně zhodnocení vhodnosti a ukázek použití.

### Seznam doporučené literatury:

ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. Sheet metal forming: processes and applications. Materials Park, Oh: ASM International, 2012. ISBN 1615038442.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York : Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření: část 2. - nekonvenční metody ve tváření. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-727-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

HORŇÁK Matúš: Problematika využítí kapaliny ve tvářecích procesech.

---

Táto práca predkladá literárnu rešerš metód tvarovania, ktoré používajú ako hlavné či sprievodné tvarovacie médium kvapalinu. Tieto metódy nachádzajú uplatnenie vo veľkosériovej výrobe tvarovo zložitejších komponentov, prevažne v automobilovom a leteckom priemysle. Sú perspektívne vďaka ich variabilnosti, geometrickej presnosti a možnosťou tvarovať súčasti, ktoré nie je možné tvarovať konvenčnými metódami. Práca uvádza princípy, predkladá ukážky súčastí zhotovených metódami, akými sú napríklad hydromechanické ťahanie, Flexform alebo postupový hydroforming a zhodnocuje ich výhody a nevýhody.

Kľúčové slová: kvapalina, tvarovanie, hydroforming, Flexform, Wheelon

## **ABSTRACT**

HORŇÁK Matúš: Utilization of Liquid in Forming Processes.

---

This diploma paper submits a literature retrieval of forming processes, which use liquid as a main or additional forming medium. These methods are used in practise in mass-produced complex components, mainly in automobile and aeronautic industry. They are perspective due to their variability, geometric accuracy and the ability to form components which cannot be made using conventional methods. The thesis introduces principles, submits specimen of units prepared by methods, such as hydro-mechanical pulling, Flexform or processual hydroforming, and evaluates their advantages and disadvantages.

Keywords: fluid, forming, hydroforming, Flexform, Wheelon

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

HORŇÁK, Matúš. *Problematika využiti kapaliny ve tvářecích procesech*. Brno, 2018. 29s, CD. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojniho inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedúci práce Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Týmto prehlasujem, že predkladanú bakalársku prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

V ..... dňa 25.5.2018

.....  
Podpis

## **POĎAKOVANIE**

Týmto ďakujem pánovi Ing. Jan Řiháček, Ph.D. za cenné pripomienky, rady týkajúce sa spracovania bakalárskej práce a za veľkú ochotu. Ďalej by som chcel poďakovať rodine a priateľom za trpezlivosť a podporu.

# OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

PodĎakovanie

Obsah

Str.

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 TVAROVANIE PLECHOV KVAPALINOV</b> .....	10
<b>1.1 Hydroform</b> .....	10
<b>1.2 ASEA</b> .....	12
<b>1.3 Wheelon</b> .....	14
<b>1.4 Flexform</b> .....	15
<b>1.5 Hydromechanické ťahanie</b> .....	17
<b>1.6 Tvarovanie tlakom kvapaliny</b> .....	20
<b>1.7 Pillow hydroforming</b> .....	21
<b>2 TVAROVANIE TRUBIEK KVAPALINOU</b> .....	23
<b>2.1 Nízkotlaký hydroforming</b> .....	23
<b>2.2 Vysokotlaký hydroforming</b> .....	24
<b>2.3 Postupový hydroforming</b> .....	26
<b>3 ZÁVERY</b> .....	29

Zoznam použitých zdrojov

Zoznam obrázkov



## ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5]

V dnešnej modernej dobe sa požaduje sofistikované riešenie technických problémov. Z hľadiska konštrukčného tak aj z hľadiska technického a dizajnového vznikajú nové tvarovo zložité súčiastky, pozri obr. 1, ktoré boli v minulosti ťažko vyrobiteľné, prevažne duté výrobky nepravidelných tvarov, zložité ohýbané trubkové profily a negatívne tvarové plochy.

Tieto súčiastky bývajú nákladné na výrobu preto, aby ich sériová výroba bola čo najefektívnejšia a najúspornejšia, používajú sa nekonvenčné technológie plošného a objemového tvarovania pri ktorých sa používa kvapalina ako hlavné alebo sprievodné tvarovacie médium. Tieto metódy sa dajú rozdeliť podľa rýchlosti tvarovania na metódy nízkorýchlostné a vysokorýchlostné alebo podľa použitého polotovaru na metódy tvarovania plechov a trubiek. Medzi tieto metódy patrí Hydroform, ASEA, Wheelon, Flexform, Pillow forming a ďalšie.



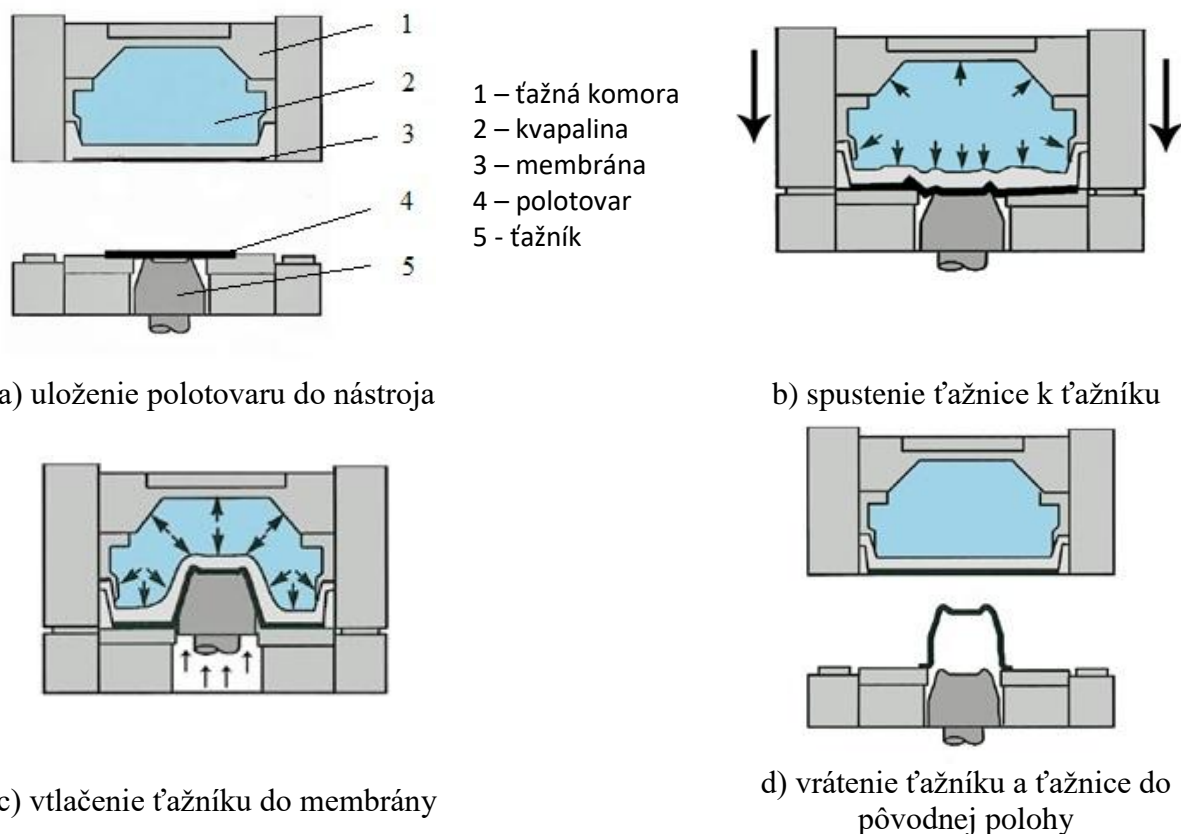
Obr. 1 Produkty vytvorené tvarovaním pomocou kvapaliny [3], [4], [5]

# 1 TVAROVANIE PLECHOV KVAPALINOV [1]

Základným kritériom je koncept nekonvenčných nástrojov, ktoré obsahujú rám, ťažník, polotovár a ťažnú komoru s kvapalinou, ktorá nahrádza pevnú ťažnicu. Ak nie je v tvarovacom nástroji polotovár v priamom kontakte s hydraulickou kvapalinou, je od nej oddelený membránou. Membrána tak slúži ako prenosové médium tvarovacieho tlaku kvapaliny na daný polotovár. Jej vlastnosti tak určujú, aké tvary je schopná vytvárať. Limitom býva spravidla najmenší rádius na výrobku. Membrána býva vyrobená napríklad z navulkanizovanej pryže alebo polyuretanu.

## 1.1 Hydroform [1], [6], [7], [8]

Hydroform je najstaršou metódou, ktorá využíva ako tvarovacie médium kvapalinu, bola vyvinutá v polovici 20. storočia v USA. Metóda vznikla na podnet vyrábať tvarovo zložitejšie súčasti, ktoré by sa zároveň dali lepšie povrchovo upravovať. Kvapalina zabezpečuje rovnomerné rozloženie sily aj pri zložitejších súčiastiach a membrána vyrobená z pryže alebo polyuretanu zase povrchovú úpravu, kde mohol byť povrch hladký, vhodný na pochrómovanie alebo pórovitý, vhodný pre smaltovanie.



Obr. 2 Postup metódy Hydroform [7]

Na začiatku procesu je polotovár položený do nástroja, pozri obr. 2a). Pri premene plošného polotovaru na priestorový, pohyblivý ťažník vtlačuje polotovár do membrány umiestnenej na pohyblivej ťažnici, pozri obr. 2b). Tým vytvára tlak v kvapaline nachádzajúcej sa v komore, kde vzniká hydrostatický tlak, ktorý pôsobí na polotovár vo všetkých bodoch rovnomerne, pozri obr. 2c) a zaisťuje, že polotovár nadobúda tvar ťažníka. Pri procese je dôležité regulovať tlak v ťažníku aj ťažnici, čo je zabezpečené pomocou ventilu umiestneného v komore ťažnice, ktorý kvapalinu postupne vypúšťa zatiaľ čo ventil pod ťažníkom kvapalinu

postupne pripúšťa. Toto je nutné z dôvodu, aby na polotovare nevzniklo zvlnenie. Tlak v komore ťažnice sa plynule mení z desiatok na stovky MPa. Po dosiahnutí požadovaného tvaru výrobku sa postupne ťažnica aj ťažník vrátia do pôvodnej polohy a hotový výťahok sa vyjme zo stroja, pozri obr. 2d). Životnosť pryže je 5 000 až 10 000 výťahov a môže sa ešte zvýšiť použitím povlaku napr. grafitu, ktorý znižuje jej drsnosť, a tým aj trenie, ktoré pri procese vzniká. Tým, že daný polotovar získava tvar vďaka tlaku kvapaliny stačí pri zmene výrobku vymeniť ťažník, čím dosahujeme veľké ekonomické úspory.



Obr. 3 Ukážka výroby metódou Hydroform [6]

#### Výhody:

- variabilita výroby – zmenu dielu dosiahneme zmenou ťažníka prípadne pridržiavača,
- vhodnosť pre hlbšie a zložitejšie ťahy,
- vhodnosť pre výrobu veľkých sérií,
- hrúbka polotovaru sa pohybuje od 0,2 do 10 mm,
- možnosť regulovania tlaku pomocou ventilu.

#### Nevýhody:

- náročnosť zariadenia z hľadiska tesnosti v hydraulickom systéme,
- vysoká nákupná cena,
- dlhšie výrobné časy z dôvodu postupného menenia tlaku v komore.

Táto metóda je využívaná najčastejšie v automobilovom alebo leteckom priemysle na výrobu veľkých sérií guľovitých tvarov, pozri obr. 3, alebo komponentov, ktoré z dôvodu pevného ťažníka sú bez negatívnych uhlov, pozri obr. 4.

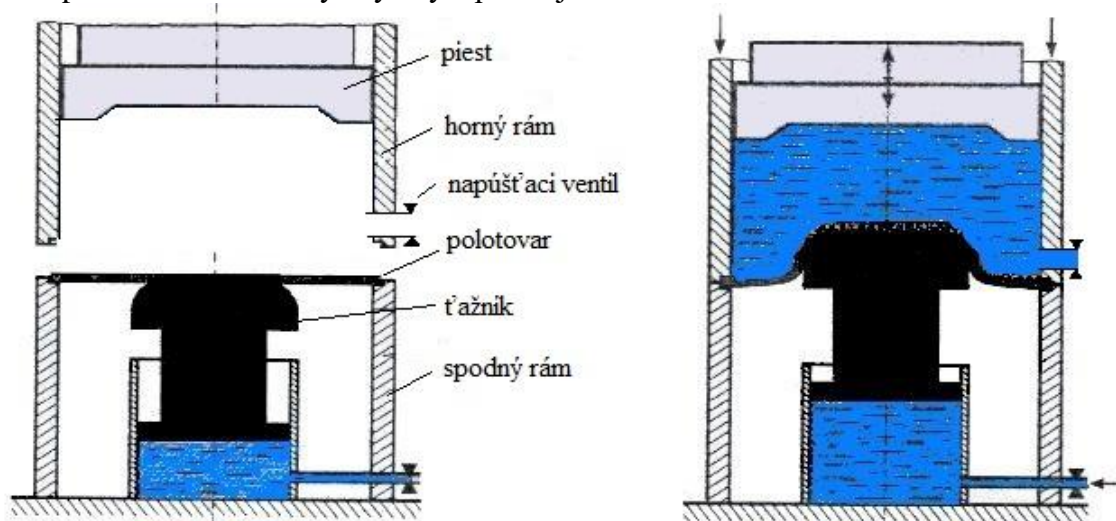


Obr. 4 Výrobky zhotovené metódou Hydroform od firmy PMF [6]

## 1.2 ASEA [7], [9], [10], [11], [12]

Metóda ASEA je modifikáciou metódy Hydroform, ktorá bola vyvinutá vo Švédsku a bola usposobená na rozmernejšie diely s dokonalým povrchom, čo je umožnené pomocou kontroly tlaku ťažníka a zároveň kontroly tlaku v kvapaline, pričom vyvođený tlak je 150 až 200 MPa. Táto metóda sa používa v dvoch prevedeniach.

- Metóda ASEA bez membrány. Pri tejto možnosti metódy ASEA je zariadenie tvorené spodným a horným rámom, pričom tieto rámy slúžia ako pridržiavače polotovaru. Spodný rám obsahuje tlakový valec, na ktorom je umiestnený ťažník, pozri obr. 5a). Ten sa zvyšovaním tlaku v tlakovom valci vytláča smerom hore. Horná komora je spočiatku prázdna. Po uložení polotovaru na ťažník sa horná komora spustí na spodnú, čím plní funkciu pridržiavaču. Do hornej komory sa začne postupne privádzať hydraulická kvapalina a po naplnení hornej komory sa začne tlak v tlakovom valci postupne zvyšovať. To spôsobí vnikanie ťažníka do polotovaru, pozri obr. 5b). Na dotvarovanie detailov sa reguluje tlak v hornej komore pomocou piestu. Po dosiahnutí požadovaného výlisku sa začne vypúšťať kvapalina z ťažnej komory a tlakového valca pod ťažníkom, vďaka čomu sa ťažník vráti do pôvodnej polohy. Po zdvihnutí horného rámu sa uvoľní prebytočná kvapalina a diel môže byť vyňatý z prístroja.



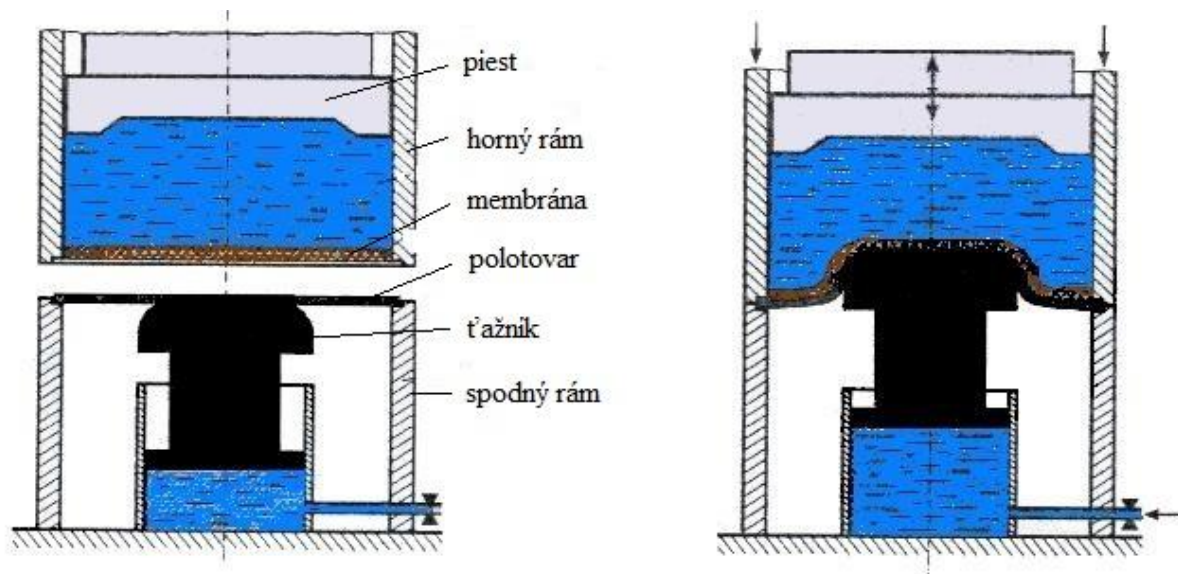
a) založenie polotovaru do nástroja

b) tvarovanie polotovaru

Obr. 5 Schéma metódy ASEA bez membrány [7]

- Metóda ASEA s membránou. Toto zariadenie sa skladá zo spodného rámu, ktorý obsahuje tlakový valec, na ktorom je umiestnený ťažník, ktorý sa zvyšovaním tlaku v tlakovom valci vytláča smerom hore a z horného rámu, ktorý obsahuje hydraulickú kvapalinu utesnenú membránou a plunžrom, ktorý reguluje tlak v hornej komore. Po vložení polotovaru na ťažník sa spustí horná komora, ktorá plní funkciu pridržiavača, pozri obr. 6a). Do tlakového valca pod ťažníkom sa začne privádzať kvapalina, čím sa zvýši tlak pod ťažníkom a ten postupne vniká do polotovaru, pozri obr. 6b). Pre zaistenie dotvarovania aj drobnejších tvarov sa zvýši tlak kvapaliny v hornom ráme pomocou piestu, ktorý sa začne pohybovať smerom dolu. Po dosiahnutí požadovaného tvaru sa piest postupne uvoľní a pri následnom odpustení kvapaliny z tlakového valca sa horná komora vráti do pôvodného stavu a diel môže byť vyňatý z prístroja.





a) založenie polotovaru do nástroja

b) tvarovanie polotovaru

Obr. 6 Schéma metódy ASEA s membránou [7]

Výhody:

- výroba rozmerných dielov,
- dobrá geometrická presnosť dielov vďaka plynulej regulácii tlaku,
- výroba komplikovanejších dielov s rebrami,
- možnosť regulácie tlaku.

Nevýhody:

- vysoká cena stroja,
- vysoké nároky na tesnosť hydraulického systému.

Vďaka veľkej ukladacej ploche sa dajú tvarovať rozmerné diely z ocele aj farebných kovov, ktoré bývajú spevnené rebrami a zároveň ohranené v jednej operácii. Hlavné produkty sú pre letecký priemysel, ako krycie plášte lietadla, vnútorné výstuhy krídel alebo v automobilovom priemysle na výrobu karosérií. Túto metódu používa aj britská spoločnosť LSNW, ktorá sa zaoberá výrobou dielov pre letecký a automobilový priemysel, pozri obr. 7. Medzi ich stálych klientov patria spoločnosti ako Airbus, Boeing, Rolls-Royce alebo Volvo.

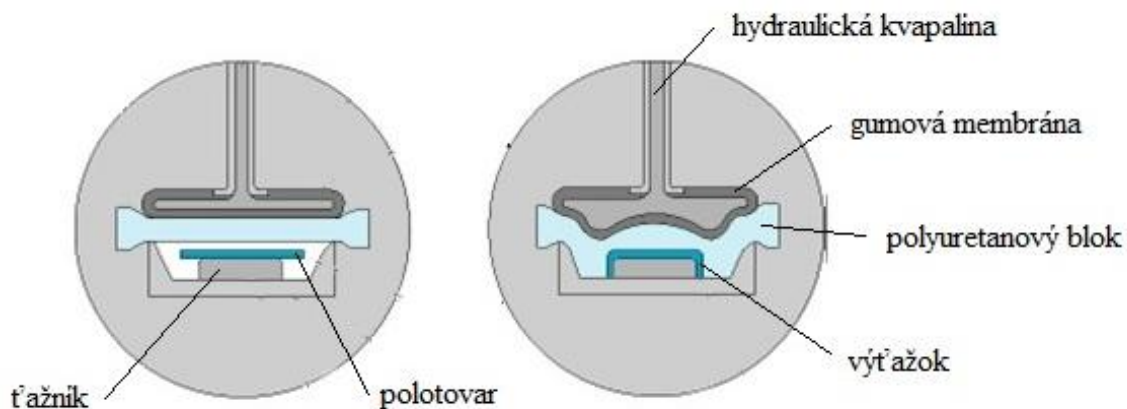


Obr. 7 Nástroj na tvarovanie metódou ASEA vo firme LSNW [12]

### 1.3 Wheelon [7], [13], [14], [15], [16], [32]

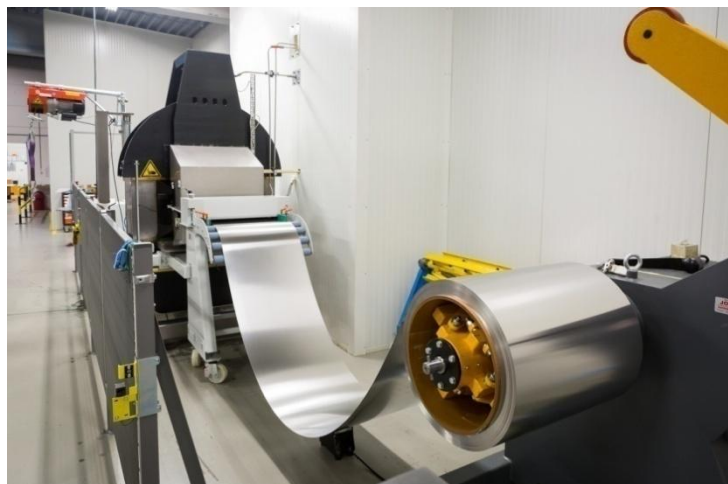
Metoda Wheelon bola vyvinutá po 2. svetovej vojne ako vylepšenie metódy Guerin, ktorá využíva silu lisu a pryže ako pružného média. Metóda vyriešila zrýchlenie výrobného procesu pomocou zaradenia viacerých ťažných jednotiek za sebou. Pri tejto metóde je ťažník, ktorý má negatívny tvar výrobku, pevne upnutý na stole lisu.

Pri tejto metóde je ťažnica nahradená blokom z polyuretanu a hydraulickou kvapalinou, ktorá sa nachádza v gumovej membráne a plní funkciu ovládacieho prvku. Pôvodne bol polyuretanový blok vyrábaný z neoprénu, ale z dôvodu zvýšenia dopytu po pryžových výrobkoch a nedostatočných zdrojoch kaučuku sa vymenil za polyuretan, ktorý má vyššiu odolnosť voči odreniu, opotrebeniu a väčšiu pevnosť v ťahu. Polyuretan je aj oveľa konzistentnejší, lepšie si zachováva svoju veľkosť, tvar a udržiava mäkkosť a odolnosť, čo eliminuje potrebu tepelného omladenia neoprénu. Avšak navzdory lepším fyzikálnym vlastnostiam polyuretanu, hlavne jeho pevnosti a húževnatosti, boli potrebné aj vyššie tlaky, až 70 MPa k dosiahnutiu požadovaného tvaru. Tvar polotovaru je dosiahnutý za pomoci zvyšovania hydraulického tlaku nad pryžovou membránou, ktorá postupne formuje polotovar, až kým ho nevytvára do požadovaného tvaru, pozri obr. 8. Po dotvarovaní je tlak znížený, čím sa membrána vráti do pôvodného stavu a polotovar je vytiahnutý z komory. Stroje využívajúce túto metódu sa delia na stroje s pohyblivým a nepohyblivým stolom.



Obr. 8 Schéma metódy Wheelon [7]

- Stroj s nepohyblivým stolom, sa používa na výrobu menej rozmerných, veľkých sérií, kedy sa polotovar môže odvíjať zo zvitku plechu, pričom na stole môže byť umiestnených viacero ťažníkov za sebou. Tým sa zaručuje vysoká produktivita. Toto zariadenie používa napríklad firma Borit, pozri obr. 9, ktorá s jeho pomocou vyrába komponenty pre výrobu palivových článkov alebo chladiacich dosiek, pozri obr. 11a).



Obr. 9 Stroj s nepohyblivým stolom vo firme Borit [15]

- Na pohyblivom stole, pozri obr. 10, môžu byť umiestnené až dva ťažníky, ktoré sa pohybujú v horizontálnom smere. Obsluha zariadenia založí polotovar na ťažník, ktorý sa v daný moment nachádza mimo komory, zatiaľ čo na ťažníku, ktorý sa nachádza v komore, prebieha proces tvarovania. Tento typ sa používa na výrobu rozmernejších výrobkov.



Obr. 10 Stroj s pohyblivým stolom od firmy Verson [16]

Výhody:

- vysoká produktivita,
- rovnomerný tlak na tvarovaný materiál,
- možnosť vytvárania viacerých dielov v jednom stroji,
- energetická nenáročnosť stroja.

Nevýhody:

- náročnosť zariadenia z hľadiska tesnosti v hydraulickom systéme,
- vysoká nákupná cena.

Táto metóda je vhodná pre výrobky s plytkými výliskami rozličných veľkostí, často ide o diely spevnené rebrami a s ohraneným obvodom, pozri obr. 11b). Táto metóda umožňuje tvarovať polotovary z titánu, nehrdzavejúcej ocele, hliníku a iných zliatin.



a) komponent do palivového článku



b) produkt s ohraneným obvodom

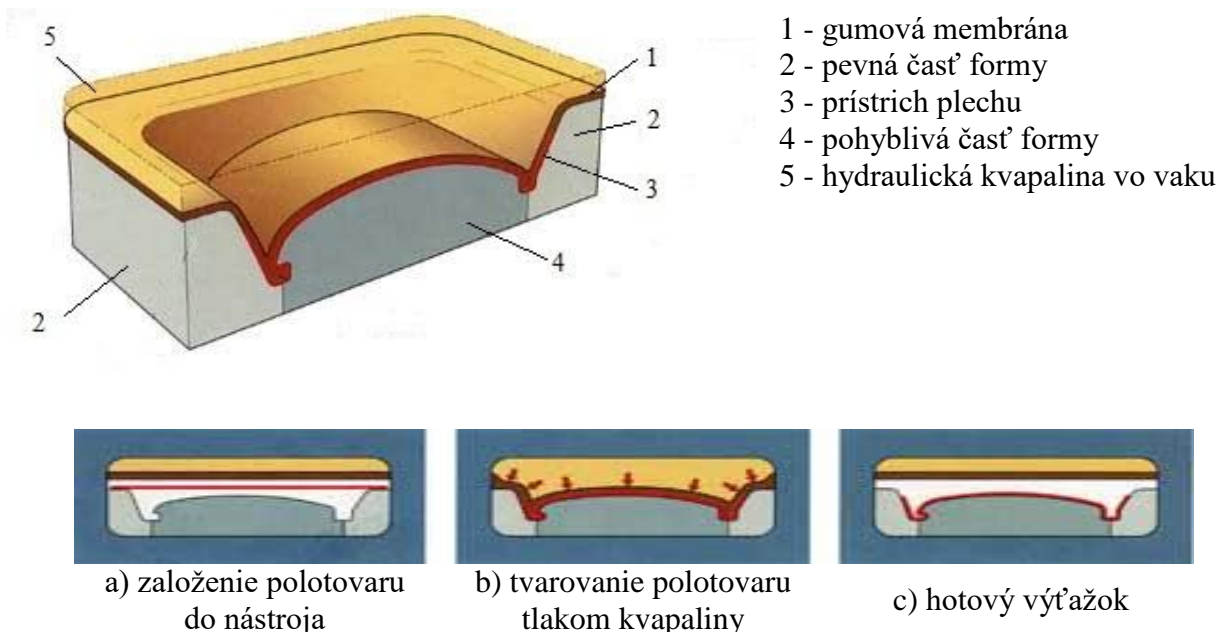
Obr. 11 Produkty vyrobené metódou Wheelon [15], [32]

#### 1.4 Flexform [1], [17], [18], [19]

Metóda Flexform bola vyvinutá za účelom odstránenia problému tvarovania dielov s negatívnymi plochami, čo vyriešilo nahradenie pevného ťažníka delenou formou v kombinácii s gumovým vakom, ktorý je naplnený hydraulickou kvapalinou, má veľkú rozpínavosť, a tým pádom je schopný sa takejto forme prispôbiť. Na to, aby gumový vak presne kopíroval tvar delenej formy, bez vytvorenia nežiaducich zvlnení a na dotvarovanie aj



najmenších rádiusov. Pri rôznych hrúbkach plechu je nutné vyvinúť dostatočne veľký tlak, čo je v tomto prípade 80 až 140 MPa, preto je gumová membrána najnamáhanejšou časťou a sú na ňu kladené veľké elastické a pevnostné nároky. Dĺžka cyklu závisí od používaného zariadenia, tvaru tvarovacieho nástroja a od nastaveného tlaku, ale bežne sa pohybuje od 30 do 150 sekúnd.



Obr. 12 Princíp metódy Flexform [19]

Gumový vak, ktorý tvorí hornú polovicu nástroja slúži aj ako pridržiač, preto stačí plech voľne položiť na spodnú polovicu nástroja, pozri obr. 12a). Po zvýšení tlaku v hydraulickej kvapaline gumový vak rovnomerne vytvára polotovar podľa tvaru spodného nástroja, pozri obr. 12b) a po dosiahnutí prednastavenej hladiny tlaku sa jeho hodnota začne znižovať. Hydraulická kvapalina vteká späť do zásobníka a gumový vak sa vráti do pôvodnej formy, pozri obr. 12c). Hotový výlisok sa odstráni z formy a založí sa nový polotovar.

Touto metódou sa usporí až 90 % z ceny nástroja a je ňou možné tvarovať viacero dielcov zložitých tvarov behom jedného cyklu. Výlisky vynikajú kvalitným povrchom, pričom hrúbka polotovaru môže byť od 0,1 do 16 mm. Najčastejšie materiály polotovaru sú stredne a vysoko pevnostné ocele, vysoko pevnostné zliatiny hliníka, antikorózne ocele a titán.



Zariadenie od firmy Quintus, pozri obr. 13, s obdĺžnikovým stolom a maximálnymi rozmermi stolu  $1,8 \times 3,6$  m, ktorý je schopný vyvinúť tlak od 80 do 140 MPa a dĺžkou cyklu 60 až 150 sekúnd, je vhodný predovšetkým k tvarovaniu väčších súčastí, najmä prototypov a malosériovú výrobu.

Obr. 13 Ukážka zariadenia Quintus [18]



Výrobky vyrobené touto metódou sú určené predovšetkým pre automobilový a letecký priemysel ako napríklad výrobky zhotovené na zariadeniach od firmy Quintus, pozri obr. 14.



a) letecký priemysel

b) automobilový priemysel

c) všeobecná výroba

Obr. 14 Výrobkov zhotovených metódou Flexform [18]

Výhody:

- nízka cena nástroja oproti bežným metódam,
- možnosť vytvoriť viacero výťazkov behom jedného cyklu,
- vysoká kvalita výťazku,
- tvarovanie výťazkov s negatívnymi plochami,
- tvarovanie aj ťažko tvarovateľných materiálov.

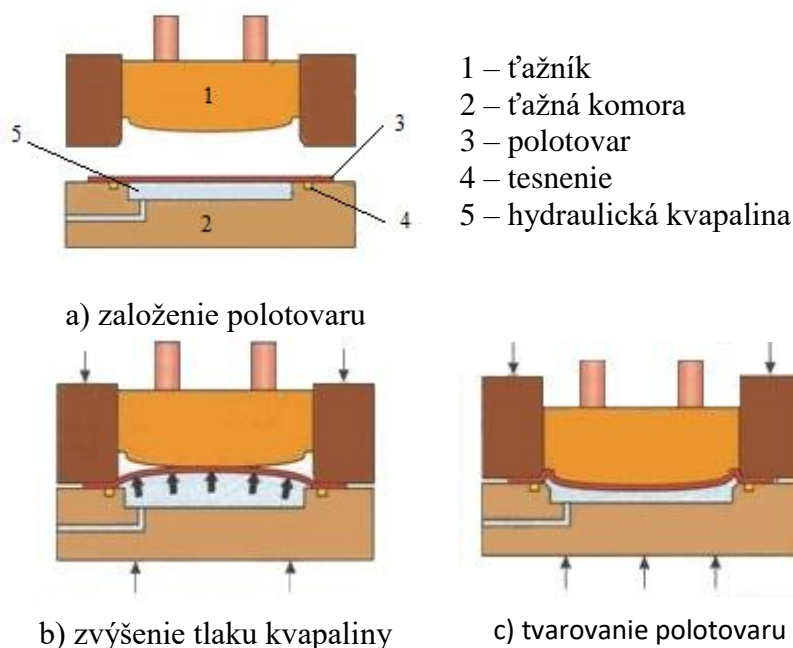
Nevýhody:

- vysoké nároky na tesnosť hydraulického systému,
- vysoká cena stroja.

## 1.5 Hydromechanické ťahanie [2], [7], [17], [20], [21]

Hydromechanické ťahanie je technológia, ktorá používa ako tvarovacie médium kvapalinu. Táto metóda vznikla ako kombinácia klasického hlbokého ťahania a tvarovania kvapalinou. Metóda sa skladá z troch fáz, pozri obr. 15 a patrí medzi bezmembránové, vďaka čomu môžeme do nástroja umiestniť rôzne sprievodné tvarovacie prvky, ako napríklad otočný ťažník, pohyblivú komoru a iné. Touto metódou je možné vytvárať hlbšie výlisky rotačného aj nerotačného tvaru, pozri obr. 18, ktoré sa používajú v automobilovom a leteckom priemysle.

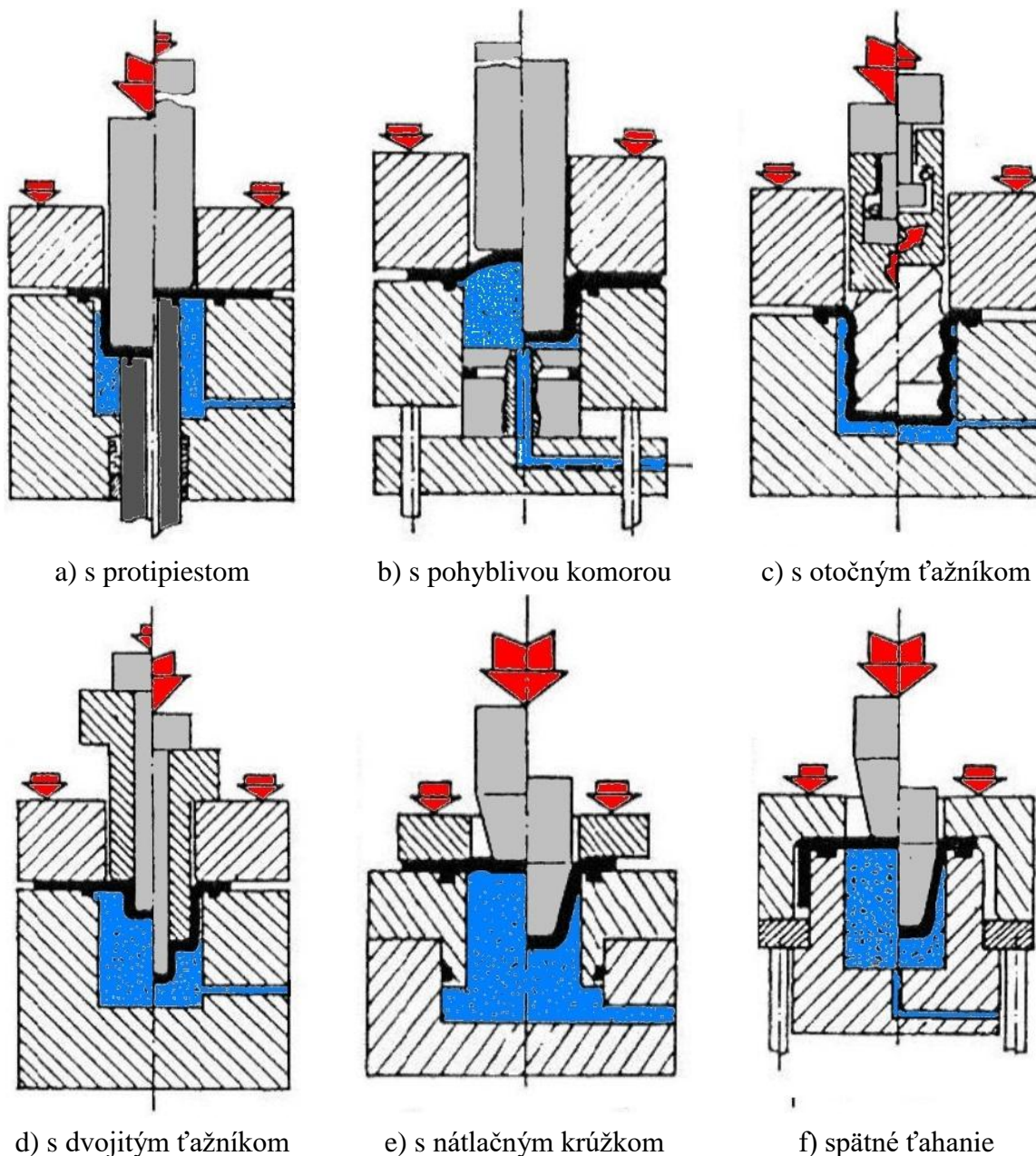
Pri tejto metóde je polotovár umiestnený na základaciu rovinu, pozri obr. 15a), pričom spodná strana polotovaru je v priamom kontakte s hydraulickou kvapalinou, ktorá sa nachádza v ťažnej komore. Keďže sa pri tejto metóde nepoužíva membrána, kvapalina musí byť v sústave utesnená pomocou tesnenia v blízkosti ťažnej hrany. V prvom kroku sa tlak kvapaliny zvýši na hodnotu, pri ktorej sa bude polotovár tvarovať, čím dochádza k čiastočnému deformovaniu podľa tvaru ťažníka, pozri obr. 15b).



Obr. 15 Postup hydromechanického ťahania [17]

V druhom kroku je ťažník tlačенý smerom dolu na polotovar a dochádza k vniknutiu ťažníka do kvapaliny nachádzajúcej sa v ťažnej komore, pozri obr. 15c). Tlak v kvapaline rastie a je regulovaný pomocou ventilu tak, aby sa materiál plynule nabaľoval na ťažník a nevznikalo na ňom nežiaduce zvlnenie. Po dosiahnutí požadovaného vnorenia ťažníka do ťažnej komory sa tlak v kvapaline zvýši na takzvanú kalibračnú hodnotu, pri ktorej dochádza k dotvarovaniu detailov, ako sú napríklad malé polomery a reliéfy povrchu, čím je výlisok vytvarovaný na požadovaný tvar. V poslednom kroku je tlak v ťažnej komore znížený, pridržiavač je zdvihnutý a hotový výlisok môže byť vyňatý zo stroja.

Široké uplatnenie tejto metódy zabezpečuje možnosť pridania sprievodného tvarovacieho prvku, a to ako na ťažník, tak aj na ťažnú komoru, pozri obr. 16.



Obr. 16 Modifikácie hydromechanického ťahania [7]

- Ťahanie s protipiestom, pozri obr. 16a), umožňuje tiahnuť krehké tenké materiály a materiály nevhodné na ťahanie, pretože protipiest tvorí oporu dna a zabraňuje jeho utrhnutiu. V určitých prípadoch sa táto metóda používa pri ťahaní rotačných súčastí bez stenčenia dna.

- Ťahanie s pohyblivou komorou, pozri obr. 16b), sa používa na ťahanie dielov rozličnej hĺbky. Táto modifikácia zvyšuje využiteľnosť stroja tým, že mení objem ťažnej komory za účelom zmeny minimálneho objemu kvapaliny v ťažnej komore potrebného pre daný výťažok. Nevýhodou je nutnosť tesniť komoru pri vysokých tlakoch.
- Pre potrebu výroby rotačnej súčasti so šróbovitým plášťom bola vytvorená modifikácia ťahania s otočným ťažníkom, pozri obr. 16c). Ťažník je do polotovaru vtlačovaný a súbežne dochádza k jeho rotácii. Pri pohybe späť musia byť otáčky ťažníka reverzované.
- Ťahanie s dvojítm ťažníkom, pozri obr. 16d), umožňuje výrobu dielov s dvomi rozdielnymi hĺbkami dna na jeden ťah. Výhodou tejto modifikácie oproti klasickej metóde je použitie jednej ťažnice s pružným prostredím. Pri nekonvenčnom spätnom ťahaní sa urobí prvý ťah bežným združeným ťaždilom, vytiahne sa rotačný výťažok a v druhej operácii sa urobí ťahanie v obrátenom smere. Konvenčný protiťažník je nahradený hydraulickou kvapalinou. Pokiaľ je ťažník dvojitý, dôjde v spodnej úvrati k vysunutiu jadra smerom hore a zvýšením tlaku v tlakovej komore, čím dôjde k spätnému vytiahnutiu materiálu smerom do ťažníka. Pokiaľ dôjde v dolnej úvrati k vysunutiu ťažníka smerom dolu, môžeme tak tvarovať diely s rozdielnymi hĺbkami dnu.

Vývojom a výrobou hydraulických lisov využívajúcich metódu hydromechanického ťahania sa zaoberá napr. česká firma Presshydraulika. Tieto lisy, pozri obr. 17, dokážu plynule regulovať silu, lisovacu rýchlosť aj dobu lisovania. Môžu byť vybavené optoelektronickou zábranou, horným a spodným vyhadzovačom, nožným ovládaním a ďalšími prvkami. Materiály vhodné na tvarovanie hydromechanickým ťahaním sú napríklad nízkouhlíkové ocele, antikoročné ocele, meď, hliník a ich zliatiny.



Obr. 17 Lisy pre hydromechanické ťahanie od firmy Presshydraulika [20]



Výhody:

- zníženie počtu ťažných operácií,
- zníženie počtu medzioperačných žíhaní,
- vysoká kvalita povrchu výťažku,
- veľká presnosť výťažkov,
- minimálne stenčenie výťažku v ohybe na dne (2 až 3 %),
- možnosť ťahať povrchovo upravené plechy bez ich poškodenia.

Nevýhody:

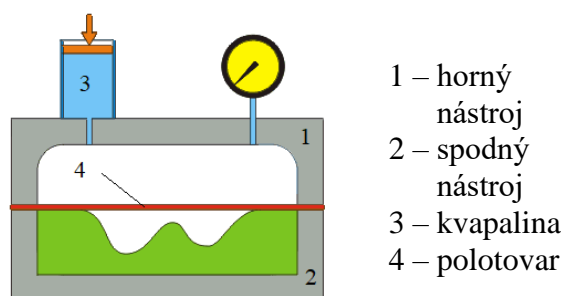
- dajú sa ťahať iba výrobky s prírubou,
- vysoký tlak pridržiavača z dôvodu tesnosti,
- nižšia produktivita kvôli kalibračnej fáze,
- použitie špeciálnych strojov a nástrojov,
- nutnosť výkonného hydraulického agregátu.



Obr. 18 Príklad výrobkov vyrobených hydromechanickým ťahaním [21]

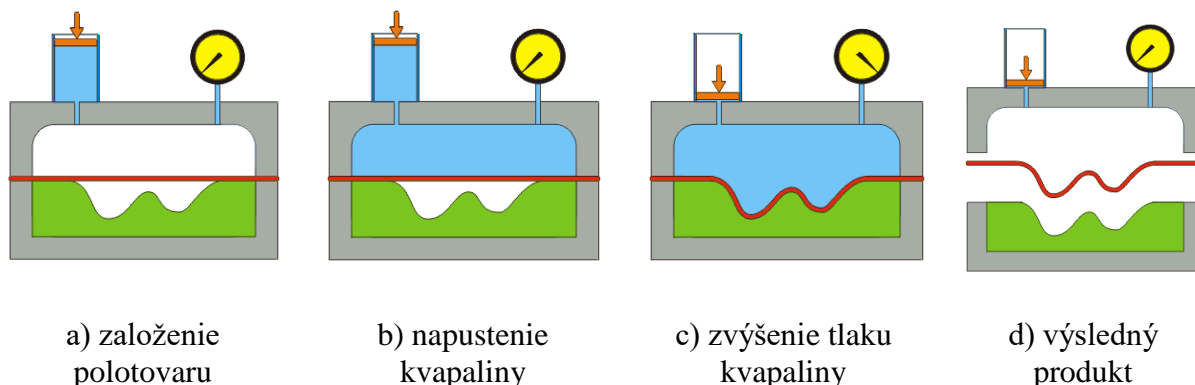
## 1.6 Tvarovanie tlakom kvapaliny [22], [23], [24], [25]

Pri tejto metóde je polotovár, ktorým je tabuľa plechu, založený do formy, pozri obr. 20a). Forma je tvorená horným a spodným nástrojom, pozri obr. 19, pričom negatívny tvar dutiny môže mať horný alebo spodný nástroj. Nástroj sa postupne naplní kvapalinou, pozri obr. 20b), a postupným zvyšovaním tlaku kvapaliny sa polotovár tvaruje podľa negatívneho tvaru dutiny, pozri obr. 20c). Po dosiahnutí požadovaného tvaru výrobku sa tlak kvapaliny postupne znižuje, kvapalina sa vypustí z formy a finálny výrobok je vyňatý zo stroja,



Obr. 19 Schéma stroja [25]

pozri obr. 20d). K vytvarovaniu tohto tvaru je nutné prekonať odpor materiálu, k čomu je potrebný vysoký tvarovací tlak, a preto je kladený veľký dôraz na pridržiavacu silu vyvinutú horným aj spodným nástrojom.



Obr. 20 Postup tvarovania tlakom kvapaliny [25]

Touto technológiou sa zaoberá spoločnosť Catalysis Additive Tooling, ktorá zároveň aj vyrába formy pre stroje používajúce túto metódu pomocou 3D tlače, pozri obr. 21a). Vďaka vytváraniu formy metódou 3D tlače a následným použitím danej formy v procese tvarovania tlakom kvapaliny, je schopná znížiť čas aj náklady na výrobu až na polovicu oproti konvenčným metódam, pričom výrobky môžu mať komplexný tvar, pozri obr. 21b).



Obr. 21 Forma a produkt firmy Catalysis Additive Tooling [25]

Výhody:

- výrobky komplexných tvarov,
- nižšia cena nástroja voči konvenčným metódam,
- vysoké presnosti výrobkov.

Nevýhody:

- vyššia cena stroja,
- nároky na tesnosť.

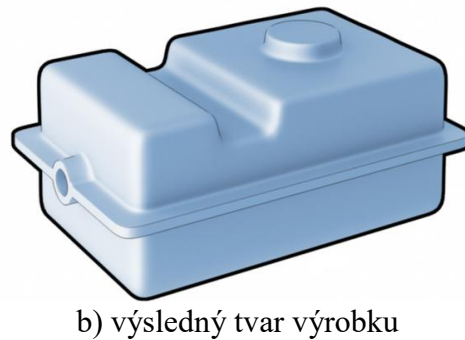
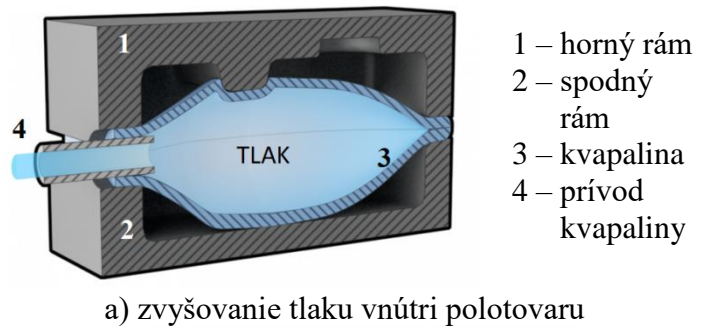
### 1.7 Pillow hydroforming [1], [8], [26], [27]

Táto metóda, na rozdiel od predchádzajúcej, využíva tlak hydraulickéj kvapaliny na tvarovanie komponentov, ktoré sú vyrobené z dvoch tabúl plechu rovnakých rozmerov. Tie sú po celom obvode zvarené, preto pri tejto metóde musí byť zaručená zvariteľnosť polotovaru. Na zváranie sa najčastejšie používa laser, ktorý neovplyvňuje štruktúru materiálu v blízkosti zvaru, čo môže mať pri následnej plastickej deformácii za následok nehomogenitu materiálu. V jednom mieste je ponechaný otvor kadiaľ sa privádza hydraulická kvapalina. Toto miesto je kritickým miestom, do ktorého sa často privára šróbenie, ktoré sa vo finálnej operácii odstráni spolu s lemom.

Zvarenec je založený medzi spodný a horný rám formy, ktoré sú zovreté a majú tvar výsledného produktu. Do vnútra polotovaru je privádzaná kvapalina, ktorá postupne zvyšuje tlak vo vnútri polotovaru, pozri obr. 22a), až dokým polotovar nevyplní tvar formy. Pri

zložitejších tvaroch, akými sú malé rádiusy alebo rebrá dochádza k nárastu tlaku na takzvanú kalibračnú hodnotu, pri ktorej prichádza k dotvarovaniu týchto detailov. Po vypustení kvapaliny z formy môžeme vyňať hotový produkt, pozri obr. 22b). Ten môže byť následne zbavený lemu vzniknutého po obvode.

Tieto produkty sa využívajú hlavne ako tvarovo zložené palivové nádrže, pozri obr. 23, ktoré sú používané v leteckom a automobilovom priemysle. V niektorých prípadoch sa dá táto metóda využiť aj bez formy, ktorá by zaisťovala jej výsledný tvar, napríklad v prípadoch jednokusových výrobkov pri ktorých sa nehľadí na ich presnosť. Na dosiahnutie požadovaného tvaru však musí byť kladený väčší dôraz na tvar polotovaru, ktorý sa bude postupne nafukovať. Pri tvorení polotovaru musíme rátať napríklad so zahnutím na výslednej podobe.



Obr. 22 Postup metódy Pillow hydroforming [26]



Obr. 23 Ukážka výrobku metódou Pillow hydroforming [27]

Výhody:

- výroba tvarovo zložitých pravidelných aj nepravidelných dutých súčastí,
- eliminácia odpruženia vďaka rovnomernému rozloženiu tlaku.

Nevýhody:

- nutnosť dokončovacích operácií (odstránenie lemov a šróbenia),
- vyššia cena stroja.

## 2 TVAROVANIE TRUBIEK KVAPALINOU [2],[ 28], [29]

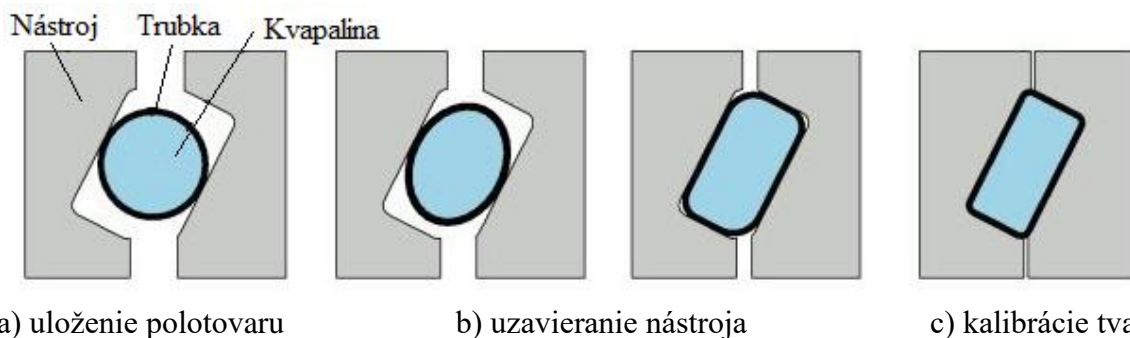
Pri rozvíjajúcom sa automobilovom priemysle a stále komplikovanejšom tvare profilov sa hľadala metóda, ktorá by bežné postupy, akými boli zváranie z viacerých výliskov, vytváranie otvorov a lisovanie niektorých častí, nahradila a hlavne zjednodušila. Tvarovanie pomocou kvapaliny vnútri profilov bola odpoveď na tento problém a priniesla aj veľa výhod, ako zníženie hmotnosti pri zachovaní mechanickej pevnosti, rozmerovú presnosť, životnosť a šetrenie životného prostredia. Týmito metódami sa dali tvarovať diely komplexných tvarov, ktoré majú zložitú geometriu, otvory, ostré polomery a ďalšie, pozri obr. 24.



Obr. 24 Ukážka produktov vytvorených pomocou tvarovania trubiek kvapalinou [28]

### 2.1 Nízkotlaký hydroforming [1], [8], [29], [30], [31], [32]

Nízkotlaký hydroforming využíva nižší vnútorný tlak kvapaliny, ktorého hodnota je maximálne 60 MPa. Pri tejto metóde je polotovár vložený do formy, pozri obr. 25a), pričom na jednom konci je pripojený na hydraulický systém a na druhom konci je zaslepený. Forma začne postupne zvierať polotovár, pozri obr. 25b), čím ho začne deformovať podľa tvaru formy. Kvapalina vo vnútri trubky, rovnomerne rozkladá tlak, ktorý je na trubku vyvíjaný a zabráňuje stenčeniu steny, pričom obvod steny polotovaru a výsledného produktu je takmer rovnaký. Keď sa forma úplne uzavrie, dôjde k miernemu zvýšeniu tlaku v kvapaline kvôli geometrickej kalibrácii tvaru, pozri obr. 25c).



Obr. 25 Postup metódy Nízkotlakého hydroformingu, upravené podľa [8]

Pri tejto metóde tvorí hydraulická kvapalina sprievodný prvok, ktorý zabráňuje defektom, akými sú napríklad zvlnenie, ovalita alebo stenčenie steny, a to vďaka svojej nestlačiteľnosti, ktorá v tomto prípade funguje ako vnútorná opora stien a zabráňuje už zmieneným defektom. Rovnomerné rozloženie sily je dôležité z hľadiska kvality povrchu, ktorá je v tomto prípade vyššia než pri použití konvenčných postupov. Táto metóda sa používa v automobilovom priemysle napríklad pri výrobe rámov, pozri obr. 26.



Výhody:

- výroba atypických tvarov,
- zamedzenie defektov,
- dobrá geometrická presnosť a kvalita povrchu,
- nedochádza k stenčeniu steny trubky.

Nevýhody:

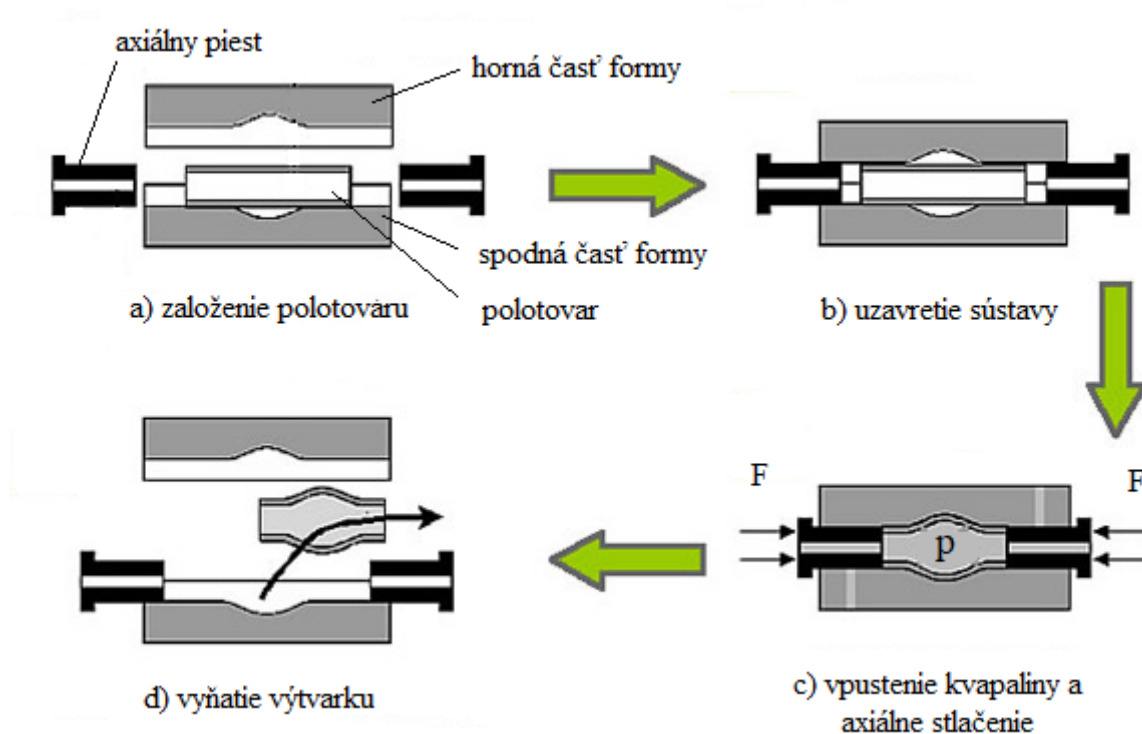
- určené pre veľké série,
- vysoká cena nástroja.



Obr. 26 Výrobok zhotovený metódou Nízkotlakého hydroformingu [31]

## 2.2 Vysokotlaký hydroforming [1], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40],

Vysokotlaký hydroforming je obdobná metóda ako nízkotlaký hydroforming, ale na rozdiel od nízkotlakého hydroformingu dochádza k úplnej zmene tvaru trubky. Pri tejto metóde sa používajú vysoké hodnoty tlaku kvapaliny, vďaka čomu je možné tvarovať aj malé rádiusy. Táto metóda sa využíva hlavne na vytváranie profilov s premenlivým prierezom, premenlivou hrúbkou steny alebo vydutou stenou. Používa sa aj na výrobu klasických kruhových a štvorcových profilov, na ktoré je kladený väčší nárok vzhľadom na hmotnosť alebo zaťaženie, ako na profile vyrobené klasickými metódami.

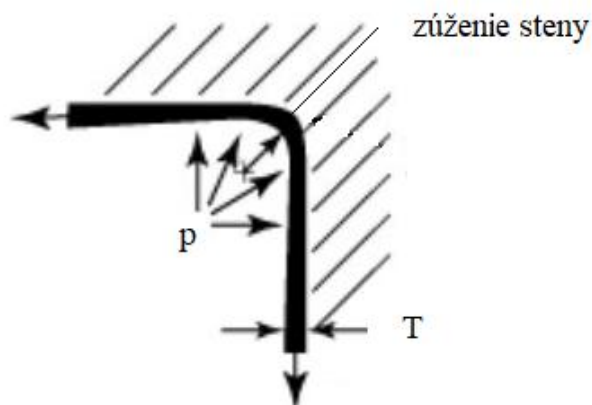


Obr. 27 Princíp metódy Vysokotlakého hydroformingu [33]

Princíp vysokotlakového hydroformingu je pomerne jednoduchý. Polotovár sa založí do formy, pozri obr. 27a), následne sa forma uzavrie a axiálne piesty zovrú polotovár, pozri obr. 27b). Skrz piesty sa do vnútra polotovaru privádza hydraulická kvapalina a zároveň vzrastá axiálna sila, ktorou pôsobia piesty na polotovár, pozri obr. 27c). To spôsobí utesnenie sústavy a zabráni nezhodnému stenčeniu steny trubky. Aby bol dosiahnutý výsledný tvar steny je

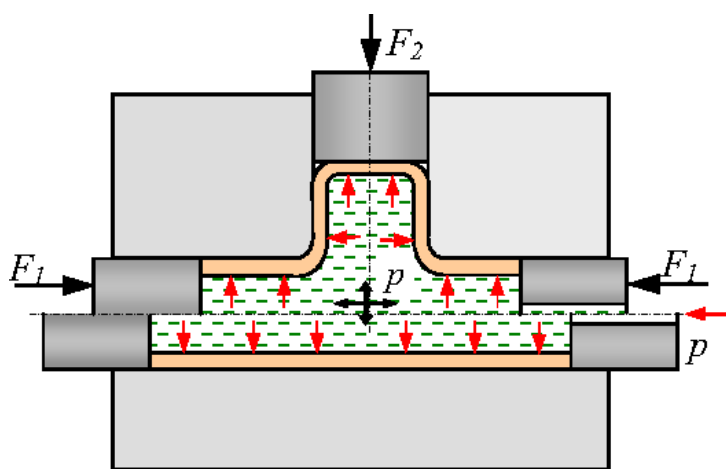


nutné prekonať odpor materiálu voči plastickej deformácii a trením medzi formou a polotovarom. Tlak hydraulickej kvapaliny preto môže nadobúdať hodnotu až 200 MPa. Po dokončení tvarovania môžeme výsledný výtvarok vyňať, pozri obr. 27d). Obvod výsledného výtvaru môže byť väčší až o 50 %. Povrch formy býva leštený a mazaný, aby dochádzalo k dokonalému klzaniu materiálu po stene.



Obr. 28 Zúženie steny v rohoch [36]

Na dotvarovanie malých rádiusov je nutné zvýšiť hodnotu tlaku kvapaliny na takzvanú kalibračnú hodnotu, ktorá býva až 240 MPa. Pri tejto fáze dochádza k nerovnomernému zúženiu steny v oblastiach malých rádiusov, a to z dôvodu, že materiál nie je schopný sklzu. Toto zoslabenie môže dosiahnuť hodnotu až 20 %, pozri obr. 28. Pri začiatku zoslabovania steny je nutné postupne znižovať tlak kvapaliny. Tento jav je nežiaduci hlavne pri veľkých plochách a môže spôsobiť deformáciu profilu.



Obr. 29 Výroba rozbočky [35]

Táto metóda sa používa aj na tvarovanie normalizovaných komponentov ako sú napríklad rozbočky často používané v inštalatérskych sieťach, v stavebníctve a iných oblastiach, kde sa nemôžu použiť komponenty vyrobené z plastov. Pri tomto procese materiál tečie cestou najmenšieho odporu, pozri obr. 29. Slepý koniec trubice je stláčaný piestom proti smeru pôsobenia tlaku kvapaliny, aby sa zabránilo jeho poškodeniu. Úspešnosť tejto metódy závisí na správnom synchronizovaní tlaku kvapaliny a sile axiálneho tlačenia.

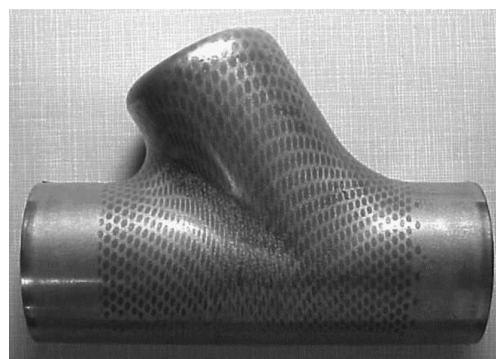
Táto metóda sa používa pri tvarovaní trubkového materiálu, ktorý je vyrobený prevažne z medi a jej zliatin, hliníku a jej zliatin alebo legovaných ocelí. Má uplatnenie v automobilovom priemysle pri výrobe zložitejších výfukových systémov, pri výrobe rámov bicyklov, často sa používa aj na výrobu tvaroviek prevažne tvaru T a Y, pozri obr. 30.

Výhody:

- výroba tvarovo zložitých súčastí,
- zníženie hmotnosti výrobku,
- zvýšenie mechanickej pevnosti,
- dobrá geometrická presnosť,
- zníženie počtu zváraných dielov.

Nevýhody:

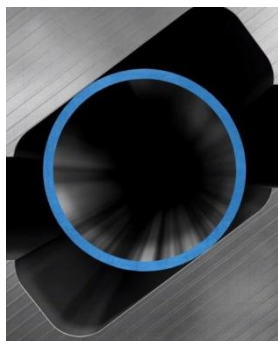
- pomalý čas cyklu,
- vysoká cena zariadenia,
- vysoké nároky na tesnosť.



Obr. 30 produktov vyrobených Vysokotlakým hydroformingom [33], [38], [40]

### 2.3 Postupový hydroforming [36], [42]

Princíp postupového hydroformingu je podobný ako pri predchádzajúcich metódach tvarovania trubiek. Skladá sa z troch krokov, kde v prvom kroku založíme polotovár do formy a forma sa čiastočne uzavrie, pozri obr. 31a). V druhom kroku sa do polotovaru privedie kvapalina a pomocou zavierania formy sa postupne zvyšuje tlak kvapaliny. V tomto kroku sa hodnoty tlaku pohybujú pri hodnotách od 35 do 70 MPa, pozri obr. 31b). Na začiatku tretieho kroku je forma úplne zavretá a tlak sa zvýši až na takzvanú kalibračnú hodnotu okolo 170 MPa, pozri obr. 31c). Pri tomto tlaku sa dotvarujú zložité tvary a zaoblenia s malým rádiusom, ktoré nebolo možné vytvarovať pri nízkom tlaku. Touto metódou sa dajú tvarovať trubky s priemerom 25 až 150 mm a hrúbkou steny 0,5 až 6 mm.



a) vloženie polotovaru do formy



b) zovretie polotovaru s kvapalinou



c) úplne uzavretie formy s kvapalinou

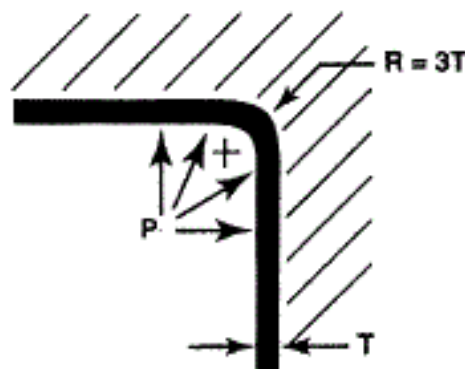
Obr. 31 Schéma Postupového hydroformingu [42]

Vďaka tomu, že je polotovár už počas deformovania formou vyplnený kvapalinou, čím ľahko prekoná trecie sily, nie je nutné nanášať mazivo medzi polotovár a formu. Túto metódu vyvinula spoločnosť Vari-Form, ktorá sa zaoberá predovšetkým výrobou súčastí pre automobilový priemysel ako napríklad časti karosérie pre Jeep, Chrysler, Nissan alebo Chevrolet, pozri obr. 32.

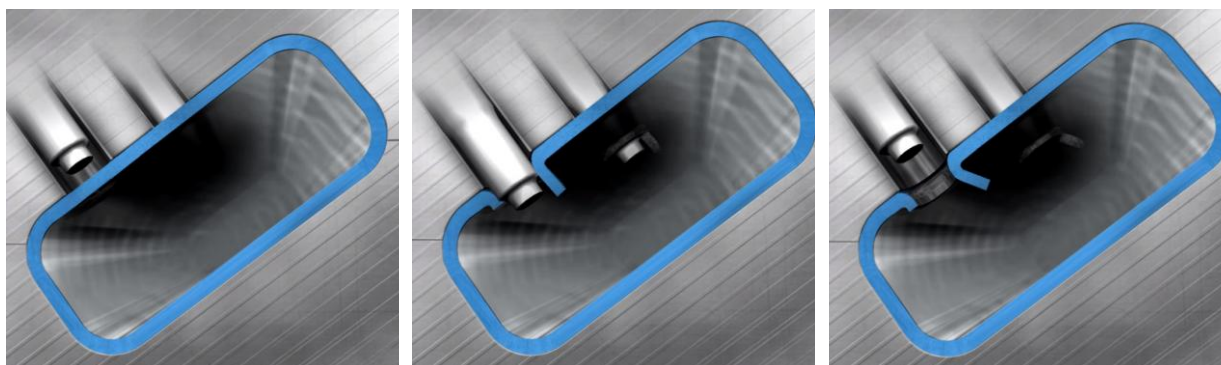


Obr. 32 Rám auta od firmy Vari-Form [42]

Vďaka tejto metóde môžeme tvarovať súčasti bez stenčovania steny a nežiaducej deformácie trubiek. Tlak v kvapaline zaisťuje konštantný objem vnútorného priestoru spolu s formou, ktorej dutina je navrhnutá tak, aby výsledný tvar mal rovnako veľký obvod ako polotovár, čím zamedzuje práve zmienenému stenčovaniu stien, a to ani pri menších rádiusoch  $R$ , ktoré v tomto prípade tvoria trojnásobok hrúbky steny  $T$ , pozri obr. 33. Na zredukovanie ďalších operácií, ktoré by po vytvarovaní nasledovali sa môže ako súčasť kalibračnej fázy vytvoriť dierovanie, čím sa šetrí čas, náklady a zlepšuje sa konečná kvalita výrobku, pozri obr. 34.



Obr. 33 Profil steny [36]



Obr. 34 Dierovanie ako súčasť Postupového hydroformingu [42]

Bola spravená štúdia spoločnosťou Vari-Form, ktorá ukazuje, že táto metóda dosahuje zníženie nákladov na jednu súčasť o 11 %, znižuje náklady na nástroj o 14 %, a zníženie hmotnosti o 7 % voči najnovším spôsobom lisovania a zvárania. Z tohto dôvodu je táto metóda vhodná pre firmy, ktoré sa zaoberajú predovšetkým veľkosériovou výrobou karosérií, rámov do automobilového a leteckého priemyslu.

Výhody:

- výroba tvarovo zložitých súčastí,
- zníženie váhy a ceny súčastí,
- vysoká geometrická presnosť,
- kvalitný povrch,
- zníženie počtu následných operácií,
- tvarovanie materiálov s nízkou ťažnosťou a vysokou pevnosťou.

Nevýhody

- rozmerné zariadenie,
- vysoká cena zariadenia,
- nároky na tesnosť.

Produkty tejto metódy môžeme nájsť predovšetkým v automobilovom priemysle ako súčasti rámov a karosérií, pozri obr. 35.



Obr. 35 Časti rámu vyrobené firmou Vari-Form [42]

### 3 ZÁVER

V práci bola spravená literárna rešerš zaoberajúca sa metódami tvarovania plechov a trubiek pomocou kvapaliny, súhrnom týchto metód, popisom ich procesov a zhrnutím ich výhod a nevýhod voči konvenčným metódam. Tieto metódy boli vyvinuté pri hľadaní nových, sofistikovanejších riešení problémov, pri ktorých bolo použitie konvenčných metód technologicky príliš náročné.

Aj keď ide stále o pomerne nové metódy, nachádzajú si čím ďalej väčšie uplatnenie vo výrobe, predovšetkým v oblasti leteckého a automobilového priemyslu. Sú schopné veľkosériovej produkcie so znížením počtu tvarovacích operácií, znížením ceny na výrobu jednotlivých dielov. Týmito metódami sa dajú tvarovať aj krehké a ťažko tvarovateľné materiály ako je napríklad titán. To všetko vďaka kvapaline, ktorá na rozdiel od konvenčných metód tvaruje polotovary vo všetkých miestach styku rovnakým tlakom.

Metódy tvarovania plechov pomocou tlaku kvapaliny ponúkajú veľkú variabilitu výroby, a to vďaka tomu, že na zmenu tvaru výrobku stačí zmeniť ťažník, prípadne hornú alebo spodnú časť nástroja. Z týchto metód je perspektívne predovšetkým hydromechanické ťahanie, ktoré vďaka veľkému množstvu modifikácií má uplatnenie vo viacerých oblastiach výroby. Ďalšou perspektívnou metódou je Flexform, táto metóda umožňuje tvarovanie dielov s negatívnymi plochami, viacerých dielov počas jedného cyklu a ušetrí až 90 % z ceny nástroja.

Metódy tvarovania trubiek pomocou kvapaliny majú svoje hlavné uplatnenie v automobilovom priemysle pri výrobe rámov, výstuží, prípadne karosérií. Oproti konvenčným metódam sú schopné tvarovať zložitejšie tvary s vyššou geometrickou presnosťou a znižujú potrebný počet medzioperácií, akým je napríklad zváranie.

Nevýhodou týchto metód je však vysoký nárok na tesnosť, hlavne pri bezmembránových metódach, na výkon hydraulického agregátu. Vysoká cena zariadenia je jedným z faktorov, ktoré spôsobujú, že tieto metódy ešte nenaplnili ich potenciál.



## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [43]

1. ALTAN, Taylan a Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming: Processes and Applications*. Materials Park: A S M International, 2012. ISBN 9781615039883.
2. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tvaření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007, 169 s. : il. ISBN 978-80-214-3425-7.
3. *HPCorse* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.hpcorse.com/en/hydroform>
4. *USA BMX* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://www.usabmx.com/site/postings/1319?fb\\_comment\\_id=831853863552012\\_850680418336023#f28c48ce11d4f6c](http://www.usabmx.com/site/postings/1319?fb_comment_id=831853863552012_850680418336023#f28c48ce11d4f6c)
5. *Design boom* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.designboom.com/design/ross-lovegrove-diatom-chair-moroso-04-09-2014/>
6. *PMF Industries, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.pmfind.com/processes/hydroforming>
7. BŘEZINA, Vít. *Kapalina jako tvářecí médium*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012. Bakalářská práce. FSI VUT. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
8. VRAŠTIAK, Michal. *Využití kapaliny ve tváření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011. Bakalářská práce. FSI VUT. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
9. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie* 1.1.vyd. Ediční středisko VUT Brno. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 220 s. ISBN 80-214-0128-1.
10. *D-J Engineering, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.djgrp.com/metal-forming>
11. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření. Část II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. : obr., čb. fot., grafy, tabulky ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4406-5.
12. *Lofting Services North West* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.loftingservices.co.uk/capabilities/asea-rubber-press-tools/asea-press-form-tool>
13. *Kastalon Inc.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.kastalon.com/rubber-forming-pad-history-comparisons-materials-introduction-gummilast-polyurethane-forming-pads-fluid-cells/>
14. *Kastalon Inc.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.kastalon.com/rubber-forming-pad-history-comparisons-materials-introduction-gummilast-polyurethane-forming-pads-fluid-cells/>
15. *Borit nv* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.borit.be/capabilities/hydrogate-forming>
16. *Hughes Bros. Aircrafters, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.hbai.com/hydroform1.htm>
17. *Technická univerzita Liberec* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm#095](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm#095)

18. *Quintus Technologies AB* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://quintustechnologies.com/metal-forming/products/fluid-cell-presses-rectangular-trays/>
19. *AVURE Technologies* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://www.chiefup.com.tw/data/high\\_pressure/flexform.htm](http://www.chiefup.com.tw/data/high_pressure/flexform.htm)
20. *Presshydraulika, s.r.o.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.presshydraulika.cz/produkty/hydraulicke-lisy/hlubokotazne/rada-zho/>
21. *Bourgeat Industrie* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.bourgeat-industrie.com/emboutissage/>
22. INGH, Harjinder. Fundamentals of hydroforming. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 2003. ISBN 08-726-3662-3
23. ŘIHÁČEK, Jan. *Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu*. Brno, 2017. 109s, 10 příloh. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
24. *Inoxveneta* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.inoxveneta.it/en/sheet-metal-hydroforming/>
25. *Catalysis Additive Tooling* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://catalysis3d.com/hydroforming/>
26. *Manufacturing Guide* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/pillow-hydroforming>
27. *Hydroforming Design Light* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [Manufacturing Guide \[online\]. \[cit. 2018-05-23\]. Dostupné z: https://www.manufacturingguide.com/en/pillow-hydroforming](https://www.manufacturingguide.com/en/pillow-hydroforming)
28. *System Engineering* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://spare-part-management.thyssenkrupp-system-engineering.com/de/automobilindustrie/werkzeugbau/hydroforming-werkzeuge.html>
29. SHINDE, Rakesh A., Bhushan T. PATIL a Ketaki N. JOSHI. Optimization of Tube Hydroforming Process (without Axial Feed) by Using FEA Simulations. *Procedia Technology* [online]. Elsevier, 2016, 23, 398-405 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.043. ISSN 2212-0173. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517301263>
30. *Excella Technologies* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://excellatechnologies.ca/services/tube-hydroform/>
31. *H & H Tube* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.h-htube.com/custom-hydroforming.html>
32. *Precision Manufacturing, Inc.* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://usherprecision.com/services/hydroforming/#prettyPhoto>
33. *Bike-advisor* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://bike-advisor.com/story/what-is-hydroforming.html>
34. *GlobalSpec* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.globalspec.com/reference/69310/203279/chapter-12-hydroforming-processes-for-tubular-parts-optimization-by-means-of-adaptive-and-iterative-fem-simulation>

35. KARABEGOVIĆ, E., M. Jurković, M. Mahmić a M. Ficko. Comparison of analitical and experimental results od fluid pressure in hydroforming of tubes. *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*. 2010, 2010(11-18), 657-660.
36. FMA Communications, Inc. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/hydroforming/pressure-sequence-and-high-pressure-hydroforming--knowing-the-processes-can-mean-boosting-profits>
37. FMA Communications, Inc. [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/hydroforming/hydroforming-y-shaped-stainless-steel-exhaust-components>
38. JIRATHEARANAT, Suwat, Christoph HARTL a Taylan ALTAN. Hydroforming of Y-shapes—product and process design using FEA simulation and experiments. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2004, 146(1), 124-129 [cit. 2018-05-23]. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00852-5. ISSN 0924-0136.
39. AutoForm Engineering [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/glossary/hydroforming/>
40. American Hydroformers [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.americanhydroformers.com/tag/american-hydroformers/page/10/>
41. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDEL. *Metal Forming: Mechanics and Metalurgy*. 3th ed. New York : Cambridge University Press, 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.
42. Vari-Form Corporation [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.vari-form.com/pressure-sequence-hydroforming/>
43. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>



## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Produkty vytvorené tvarovaním pomocou kvapaliny [3], [4], [5] .....	9
Obr. 2 Postup metódy Hydroform [7] .....	10
Obr. 3 Ukážka výroby metódou Hydroform [6].....	11
Obr. 4 Výrobky zhotovené metódou Hydroform od firmy PMF [6].....	11
Obr. 5 Schéma metódy ASEA bez membrány [7].....	12
Obr. 6 Schéma metódy ASEA s membránou [7].....	13
Obr. 7 Nástroj na tvarovanie metódou ASEA vo firme LSNW [12] .....	13
Obr. 8 Schéma metódy Wheelon [7] .....	14
Obr. 9 Stroj s nepohyblivým stolom vo firme Borit [15] .....	14
Obr. 10 Stroj s pohyblivým stolom od firmy Verson [16] .....	15
Obr. 11 Produkty vyrobené metódou Wheelon [15], [32].....	15
Obr. 12 Princíp metódy Flexform [19].....	16
Obr. 13 Ukážka zariadenia Quintus [18].....	16
Obr. 14 Výrobky zhotovených metódou Flexform [18].....	17
Obr. 15 Postup hydromechanického ťahania [17].....	17
Obr. 16 Modifikácie hydromechanického ťahania [7] .....	18
Obr. 17 Lisy pre hydromechanické ťahanie od firmy Presshydraulika [20] .....	19
Obr. 18 Príklad výrobkov vyrobených hydromechanickým ťahaním [21] .....	20
Obr. 19 Schéma stroja [25].....	20
Obr. 20 Postup tvarovania tlakom kvapaliny [25].....	21
Obr. 21 Forma a produkt firmy Catalysis Additive Tooling [25] .....	21
Obr. 22 Postup metódy Pillow hydroforming [26].....	22
Obr. 23 Ukážka výrobku metódou Pillow hydroforming [27] .....	22
Obr. 24 Ukážka produktov vytvorených pomocou tvarovania trubiek kvapalinou [28].....	23
Obr. 25 Postup metódy Nízkotlakého hydroformingu, upravené podľa [8].....	23
Obr. 26 Výrobok zhotovený metódou Nízkotlakého hydroformingu [31].....	24
Obr. 27 Princíp metódy Vysokotlakého hydroformingu [33] .....	24
Obr. 28 Zúženie steny v rohoch [36].....	25
Obr. 29 Výroba rozbočky [35] .....	25
Obr. 30 produktov vyrobených Vysokotlakým hydroformingom [33], [38], [40].....	26
Obr. 31 Schéma Postupového hydroformingu [42].....	26
Obr. 32 Rám auta od firmy Vari-Form [42] .....	27
Obr. 33 Profil steny [36].....	27
Obr. 34 Dierovanie ako súčasť Postupového hydroformingu [42].....	27
Obr. 35 Časti rámu vyrobené firmou Vari-Form [42] .....	28